

Ю. С. Бікс

## ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЛІНГВІСТИЧНИХ ЗМІННИХ АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*Запропоновано розрахунковий апарат впливу фізико-механічних параметрів складових бетону, технологічних параметрів його обробки, якості води затворення на міцність бетону на основі апарату нечіткої логіки. Ієрархічна система логічних рівнянь, що є однією із баз знань, покладена в основу математичної моделі, дозволяє оцінити величину прогнозованого показника міцності бетону як функцію від зазначених факторів впливу.*

**Ключові слова:** нечітка логіка, математична модель, прогнозування, міцність бетону.

### Вступ

Сучасне висотне будівництво вимагає використання високоміцних бетонів для зменшення питомих витрат бетону, що відповідно зменшує тиск конструкції на фундамент. Очевидно, що підбір складу бетону із заданими властивостями, зокрема границею міцності на стиск набуває особливої актуальності. Одним із ефективних методів отримання бетону із заданими властивостями, в цьому випадку із заданою величиною міцності на стиск, є математичне моделювання. Рядом авторів запропоновані методики проектування бетонів із заданими властивостями [1 – 6]. Кожна з цих методик має свої позитивні якості, однак всі методики не в повній мірі враховують фактори впливу на міцність бетону, які характеризуються не тільки кількісними, але й якісними показниками. Одним із ефективних інструментів врахування якісних та кількісних факторів впливу складових бетонної суміші та типу технологічної обробки на кінцеву міцність бетону є моделювання із застосуванням нечіткої логіки [7, 8, 9].

**Метою роботи** є створення експертно-модельованої системи для багатофакторного аналізу впливу головних показників складу бетонної суміші на прогнозовану міцність бетону. Це фізико-механічні параметри заповнювачів та технологічні параметри обробки бетонної суміші. Для вирішення цієї задачі запропонований математичний апарат, що базується на основі теорії нечіткої логіки. Метод ідентифікації нелінійних об'єктів нечіткими базами знань [7], як взаємопов'язана сукупність математичних моделей, дозволяє використовувати експертно-лінгвістичну інформацію для оптимального складу заповнювачів бетону та типу технологічної обробки за результатами віртуального експерименту.

### Матеріали та результати досліджень

Для виявлення ієрархічних зв'язків та факторів, що впливають на міцність бетону, було запропоновано модель у вигляді “ чорної скриньки ” (рис. 1). В якості вхідних сигналів вказані фактори впливу на міцність бетону, в якості вихідного сигналу вказана міцність бетону на стиск. Всі фактори впливу розбиті на дві групи: технологічні фактори обробки бетонної суміші та фізико-механічні характеристики складових бетону. Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на прийняття рішення щодо вибору параметрів формування бетону із прогнозованою міцністю, виконана їх відповідна класифікація за кількісними та якісними показниками: фізико-механічними та технологічними.

До технологічних показників належать: вплив тиску, вплив температури тужавлення, вплив вологості, вплив способу ущільнення бетонної суміші. До фізико-механічних факторів можна віднести: водоцементне відношення, добавки (пластифікатори), якість води, марка цементу, тип цементу (портландцемент, портландцемент з добавками, шлакопортландцемент, пуцолановий цемент, композитний цемент), а також тип, якість поверхні та форми крупного заповнювача, модуль крупності піску [6].

Усі фактори впливу, що позначаються на оптимальному складі бетону з заданою міцністю, розглядаються як лінгвістичні змінні, що задані на відповідних універсальних множинах і оцінюються нечіткими термами. Якісний нечіткий терм є лінгвістичною

змінною, значення якої виражається словом [7].

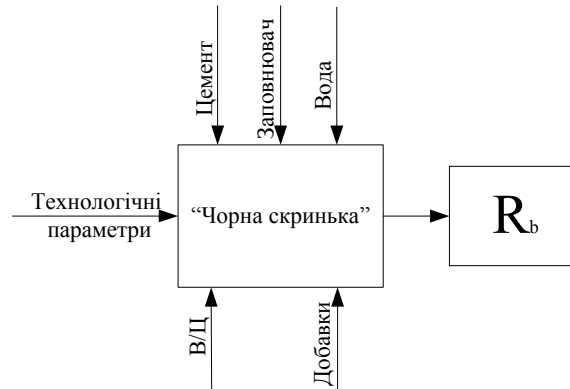


Рис. 1. Модель впливу факторів, які обумовлюють міцність бетону

В якості нечітких термів для оцінювання лінгвістичних змінних прийняті кількісні вирази “низька” (Н), “нижче середньої” (нС), “середня” (С), “вище середньої” (вС), та “висока” (В). Використання нечітких термів дозволяє побудувати експертні нечіткі бази знань, які віддзеркалюють зв’язки між вхідними та вихідними змінними [7]. Виконана формалізація та ієрархічна класифікація параметрів факторів, що впливають на кінцеву міцність бетону. Це дозволяє побудувати функції належності нечітких оцінок впливу кількісних та якісних параметрів. Ці функції будуть використані при моделюванні міцності бетону із заданою величиною.

Розглядаючи доцільність технологічних та фізико-механічних факторів впливу (ТФМФВ) на міцність бетону на системному рівні, лінгвістичну змінну (Y), що характеризує міцність бетон, можна подати у вигляді залежності

$$Y=f(Y_1, Y_2, Y_3, X_4), \quad (1)$$

де  $Y_1$  – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує технологічні параметри;  $Y_2$  – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує фізико-механічні параметри заповнювачів;  $Y_3$  – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує проміжні параметри міцності бетону;  $X_4$  – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує рН води затворення.

Лінгвістичну змінну, що описує технологічні параметри можна подати виразом

$$Y_1=f_1(X_{11}, X_{21}, X_{31}, X_{41}), \quad (2)$$

де  $X_{11}$  – (ЛЗ) “вплив тиску”;  $X_{21}$  – (ЛЗ) “вплив температури”;  $X_{31}$  – (ЛЗ) “вплив вологості”;  $X_{41}$  – (ЛЗ) “вплив ущільнення”.

У загальному вигляді математична модель міцності бетону являє собою ієрархічну нечітку систему, в якій проміжні значення баз знань змінних  $f_1, f_2, f_3$  є вхідними для верхньої бази знань Y, причому для описання проміжних змінних також використовуються нечіткі терми з кількісними виразами “низька” (Н), “нижче середньої” (нС), “середня” (С), “вище середньої” (вС), та “висока” (В). Уся вхідна інформація щодо всіх параметрів, які впливають на кінцеву змінну Y, обробляється у програмному середовищі “MATLAB 7”.

Приклад нечіткої матриці знань з врахуванням введених якісних термів для моделювання залежності (2) наведено у табл. 1. Ієрархічна нечітка система прогнозування міцності бетону у вигляді дерева представлена на рис. 2.

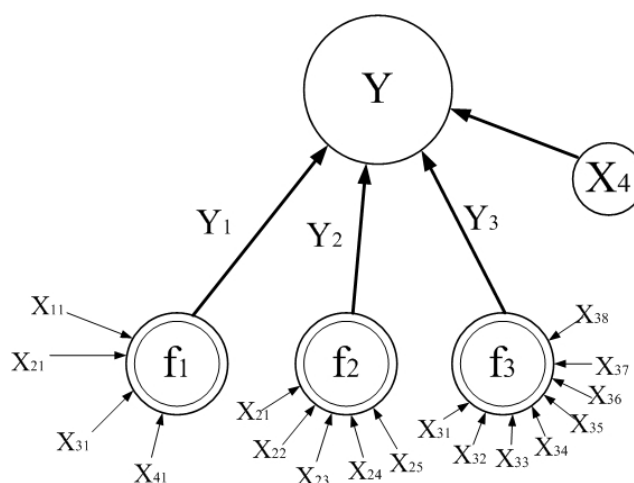


Рис. 2. Ієрархічна нечітка система прогнозування міцності бетону

Аналогічні матриці (бази) знань на основі експертних оцінок будуються для решти факторів впливу математичної моделі міцності бетону, тобто  $Y_2$ ,  $Y_3$ .

Таблиця 1

Технологічні параметри									
Якщо				То	Якщо				То
$X_{11}$	$X_{21}$	$X_{31}$	$X_{41}$	$Y_1$	$X_{11}$	$X_{21}$	$X_{31}$	$X_{41}$	$Y_1$
Н	Н	Н	Н	Низький (Н)	С	нС	С	С	Середній (С)
Н	Н	Н	С		С	нС	С	В	
Н	Н	Н	В		С	нС	В	Н	
Н	Н	С	Н		С	нС	В	С	
Н	Н	С	С		С	нС	В	В	
Н	Н	С	В		С	С	Н	Н	
Н	Н	В	Н		С	С	Н	С	
Н	Н	В	С		С	С	Н	В	
Н	Н	В	В		С	С	С	Н	
Н	нС	Н	Н		С	С	С	С	
Н	нС	Н	С		С	С	С	В	
Н	нС	Н	В		С	С	В	Н	
Н	нС	С	Н		С	С	В	С	Вище середнього (вС)
Н	нС	С	С		С	С	В	В	
Н	нС	В	Н		С	вС	С	С	
Н	нС	В	С		С	вС	С	В	
Н	С	Н	Н		С	вС	В	С	
Н	С	Н	С		С	вС	В	В	
Н	С	С	Н		С	В	Н	В	
Н	С	С	С		С	В	С	Н	
Н	С	В	Н		С	В	С	С	
Н	С	В	С		С	В	С	В	
Н	вС	Н	Н	Нижче середнього (нС)	С	В	В	Н	
Н	вС	Н	С		С	В	В	С	
Н	вС	Н	В		С	В	В	В	
Н	вС	С	Н		В	нС	Н	С	
Н	вС	С	С		В	нС	Н	В	
Н	вС	С	В		В	нС	С	Н	
Н	вС	В	Н		В	нС	С	С	
Н	вС	В	С		В	нС	С	В	

Н	В	Н	Н		В	нС	В	Н	
Н	В	Н	С		В	нС	В	С	
Н	В	Н	В		В	нС	В	В	
Н	В	С	Н		В	С	С	С	
Н	В	С	С		В	С	Н	В	
Н	В	С	В		В	С	С	В	Високий (В)
Н	В	В	Н		В	С	В	Н	
Н	В	В	С		В	С	В	С	
С	Н	Н	Н		В	С	В	В	
С	Н	Н	С		В	вС	Н	С	
С	Н	Н	В		В	вС	Н	В	
С	Н	С	Н		В	вС	С	Н	
С	Н	С	С		В	вС	С	С	
С	Н	С	В		В	вС	С	В	
С	Н	В	Н		В	вС	В	С	
С	Н	В	С		В	вС	В	В	
Н	вС	В	В	Середній (С)	В	В	Н	Н	
Н	В	В	В		В	В	Н	С	
Н	вС	В	В		В	В	Н	В	
С	нС	Н	В						

Лінгвістичним висловлюванням, що наведені у таблиці 1 відповідає, система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних відповідному терму

$$\begin{aligned} \mu_H(X1) = & \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mu_{HC}(X1) = & \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \\ & \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \\ & \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_H(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(X1) = & \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_B(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \\ & \vee \mu_H(X_{11}) \wedge \mu_{BC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \\ & \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_C(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \\ & \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \\ & \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_{HC}(X_{21}) \wedge \mu_B(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_H(X_{41}) \\ & \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_C(X_{41}) \vee \mu_C(X_{11}) \wedge \mu_C(X_{21}) \wedge \mu_H(X_{31}) \wedge \mu_B(X_{41}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{bC}(X_1) = & \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \quad (6) \\ & \bigvee \mu_c(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{hC}(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{hC}(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{hC}(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{hC}(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{hC}(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{hC}(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{hC}(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{hC}(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_b(X_1) = & \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_c(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_c(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \quad (7) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_{bC}(X_{21}) \wedge \mu_b(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_h(X_{41}) \\ & \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_c(X_{41}) \bigvee \mu_b(X_{11}) \wedge \mu_b(X_{21}) \wedge \mu_h(X_{31}) \wedge \mu_b(X_{41}). \end{aligned}$$

Отримана система нечітких логічних рівнянь (3 – 7) є відображенням однієї з чотирьох баз знань, що входять у математичну модель прогнозування міцності бетону на основі нечіткої логіки. Подальша обробка параметрів моделі у комплексі “MATLAB 7” [9] дозволить навчити модель та провести її точне налаштування для адекватного відображення вихідного сигналу “чорної скриньки”, тобто міцності бетону, як функцію від вхідних параметрів скриньки, як-то компонентів бетону, типу технологічної обробки, якості води.

### Висновки

1. Відповідно до виконаної класифікації кількісних та якісних параметрів впливу на міцність бетону отримані нечіткі логічні рівняння на технологічному рівні, які пов’язують функції належності вхідних і вихідних змінних, що обумовлено використанням при їх побудові операцій min та max.

2. Ієрархічна система логічних рівнянь (3 – 7) дозволяє за допомогою математичної моделі міцності бетону на основі нечіткої логіки оцінити величину прогнозованого показника міцності бетону в залежності від технологічних параметрів впливу, а також вирішує задачу оптимізації цих чинників.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дворкин Л. И. Основы бетоноведения / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – СПб: ООО “Строй- Бетон”, 2006. – 692 с.
2. Дворкин Л. И. Проектирование составов бетонов с заданными свойствами / Л. Дворкин, О. Дворкин. – Ровно: Изд-во РГТУ, 1999. – 202 с.
3. Современные методы оптимизации композитных материалов / [Вознесенский В. А., Выровой В. Н., Керш В. Я. и др.]; под ред. В. А. Вознесенского. – К.: – Будівельник, 1983. – 144 с.
4. Дудар І. Н. Теоретичні основи технології виробів із пресованих бетонів: монографія / І. Н. Дудар. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 89 с.
5. Рунова Р. Ф. Аналіз ефективності використання в’язучих із мінеральними добавками в бетонних масивах / Р. Ф. Рунова, О. В. Прянішніков // Будівництво України: Науково-виробничий журнал. – 2008. – № 2. – С. 18 – 21
6. Будівельне матеріалознавство / [Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., В. Б. Барановський та ін.]; за ред. П. В. Кривенко. – К.: – ТОВ УВПК “Ексоб”, 2004. – 702 с.

7. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации / А. П. Ротштейн. – Винница: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 320 с.
8. Митюшкин Ю. И. Soft Computing: идентификация закономерностей нечёткими базами знаний / Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Винница: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2002. – 145 с.
9. Штовба С. Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB. / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2007. – 288 с.

**Бікс Юрій Семенович** – аспірант кафедри містобудування та архітектури, yustas12@rambler.ru.  
Вінницький національний технічний університет.